

УДК 621

Якубовский Ч.А., Якубовский А.Ч.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАКОВКИ

МНОГОЖИЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Введен критерий выбора паковки проволоки в тонкостенной трубке того или иного поперечного сечения для использования в качестве многожильного металлического кабеля в магнитных системах термоядерного реактора. Установлено, что с целью рационального использования материала целесообразно применять упорядоченную укладку проволок в шестигранную оболочку.

Многие, главным образом электротехнические, устройства и коммуникации предполагают использование металлических многожильных кабелей, представляющих собой паковку проволок различного сечения в полимерной, резиновой, металлической оболочке с изоляцией или без нее. Например, гибкие шланговые кабели высокого напряжения используют для подачи электроэнергии к землеройным и горнодобывающим машинам или в лифтовых установках; бронированные кабели используют в магистральных линиях дальней связи, в силовых и осветительных установках, в линиях электропередачи высокого напряжения; маслонаполненные кабели высокого давления в стальном трубопроводе нашли применение на электростанциях при соединении повышающих трансформаторов, в районах с интенсивной застройкой, а также при необходимости прокладки через водные преграды.

В настоящее время ведутся разработки оборудования магнитных систем термоядерного реактора ИТЭР, в частности, сверхпроводящего кабеля высокого напряжения [1]. В качестве такого изделия может быть использована паковка медной проволоки круглого сечения в тонкостенной металлической (медной или стальной) оболочке (трубке). В зависимости от целевого назначения кабеля укладка проволоки (жил) в нем может быть произвольная или упорядоченная, а оболочка — круглого, шестигранного, прямоугольного или любого другого поперечного сечения (рис. 1).

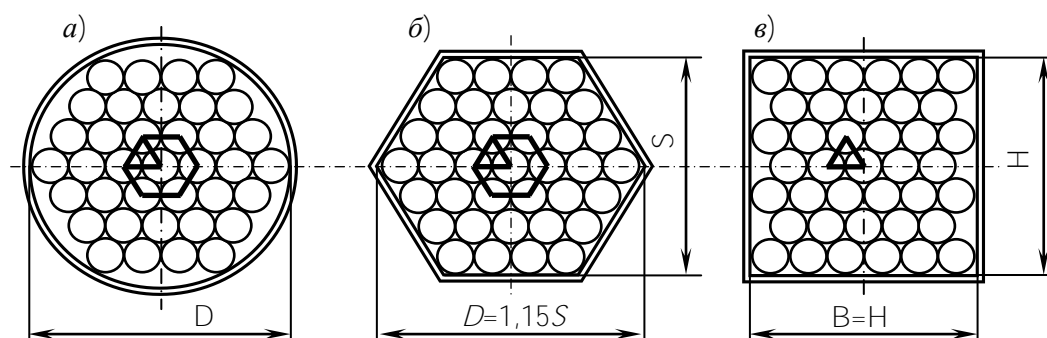


Рис. 1. Сечения с упорядоченным расположением проволок в паковке различного исполнения

Важным критерием выбора того или иного исполнения является плотность заполнения оболочки проволокой. Этот показатель удобно выражать коэффициентом заполнения:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{A_{\text{пол}}} = \frac{A \cdot n}{A_{\text{пол}}},$$

где $\sum A_i$ — площадь, занимаемая паковкой; A — площадь поперечного сечения одной проволоки; n — количество проволок в паковке; $A_{пол}$ — площадь сечения полости трубки.

Стремление достичь более плотной паковки объясняется рациональным использованием материала и уменьшением объема воздушных каналов. Это реализуется упорядоченной укладкой проволоки и выражается коэффициентом заполнения, близким к 1 ($K \leq 1$). Очевидно, что при произвольной, беспорядочной укладке образуются большие просветы, и паковка становится наименее плотная.

При упорядоченном расположении проволок одинакового диаметра в **круглой** оболочке в сечении формируются треугольные ячейки и образуются ортогональные слои в виде правильного шестигранника (см. рис. 1. а). Диаметр D полости оболочки зависит от диаметра d используемой проволоки и необходимого количества ее слоев m . Площадь поперечного сечения полости определяется выражением:

$$A_{пол} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi}{4} \cdot [d(2m+1)]^2.$$

С учетом площади сечения проволоки

$$A = \pi d^2 / 4,$$

а также возможного количества проволок в круглой паковке при m слоях

$$n = 3m(m+1) + 1$$

находим:

$$K = \frac{\frac{\pi d^2}{4} \cdot [3m(m+1) + 1]}{\frac{\pi}{4} \cdot [d(2m+1)]^2} = \frac{3m(m+1) + 1}{4m(m+1) + 1}.$$

Однако, при упорядоченной укладке проволок в круглую оболочку остаются значительные свободные зоны, куда могут «сваливаться» жилы крайнего слоя, поэтому существует большая вероятность нарушения регулярности укладки. В этом отношении при том же наборе проволок целесообразно использовать шестигранную оболочку (см. рис. 1. б), исключая такую вероятность. Площадь поперечного сечения ее полости равна:

$$A_{пол} = \frac{3SD}{4} = \frac{3S}{4} \cdot \frac{2S}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}S^2}{2},$$

где размер S и количество слоев m проволоки диаметром d находятся в зависимости:

$$S = d(\sqrt{3}m + 1).$$

Тогда:

$$K = \frac{\frac{\pi d^2}{4} \cdot [3m(m+1)+1]}{\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot [d(\sqrt{3}m+1)]^2} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{3m(m+1)+1}{3m(m+2\sqrt{3}/3)+1} \approx 0,9 \cdot \frac{3m(m+1)+1}{3m(m+1,15)+1}.$$

При укладке проволоки в **прямоугольную** оболочку упорядоченное и наиболее устойчивое расположение жил также сопровождается формированием треугольных ячеек (см. рис. 1. в), но слои следует рассматривать отдельно — горизонтальные m_1 и вертикальные m_2 . Они определяют соответственно ширину B и высоту H полости прямоугольной оболочки

$$B = dm_1 \text{ и } H = d \cdot \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (m_2 - 1) + 1 \right]$$

с площадью сечения полости

$$A_{пол} = BH = d^2 m_1 \cdot \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (m_2 - 1) + 1 \right].$$

Тогда при количестве проволок в паковке

$$n = \left(m_1 - \frac{1}{2} \right) \cdot m_2$$

коэффициент заполнения равен:

$$K = \frac{\frac{\pi d^2}{4} \cdot \left(m_1 - \frac{1}{2} \right) \cdot m_2}{d^2 m_1 \cdot \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (m_2 - 1) + 1 \right]} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{m_1 - \frac{1}{2}}{(m_2 - 1) + \frac{2}{\sqrt{3}}} \approx 0,9 \cdot \frac{1 - \frac{1}{2m_1}}{1 + \frac{2}{13m_2}}.$$

При упорядоченной и устойчивой укладке проволоки в **квадратную** оболочку, когда $B=H$, появляется взаимосвязь между слоями:

$$m_1 = m = \frac{\sqrt{3} \cdot (m_2 - 1)}{2} + 1 \rightarrow m_2 = \frac{2 \cdot (m - 1)}{\sqrt{3}} + 1.$$

Тогда площадь сечения полости оболочки и количество проволок в паковке могут быть выражены:

$$A_{пол} = B^2 = d^2 m^2; \quad n = \left(m - \frac{1}{2} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot (m - 1)}{\sqrt{3}} + 1 \right) = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(m - \frac{1}{2} \right) \cdot \left(m - \frac{2}{15} \right),$$

а коэффициент заполнения равен:

$$K = \frac{\pi d^2}{4 m^2} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(m - \frac{1}{2}\right) \cdot \left(m - \frac{2}{15}\right) \approx 0,9 \cdot \left(1 - \frac{1}{2m}\right) \cdot \left(1 - \frac{2}{15m}\right).$$

В случае неустойчивой упорядоченной укладки проволоки в прямоугольную оболочку, когда образуются ячейки четырехугольной формы:

$$n = m_1 m_2 ;$$

$$A_{нол} = BH = d^2 m_1 m_2 ,$$

коэффициент заполнения не зависит от количества слоев ни в одном из направлений и равен:

$$K = \frac{\frac{\pi d^2}{4} \cdot m_1 m_2}{d^2 m_1 m_2} = \frac{\pi}{4} = 0,785 = const .$$

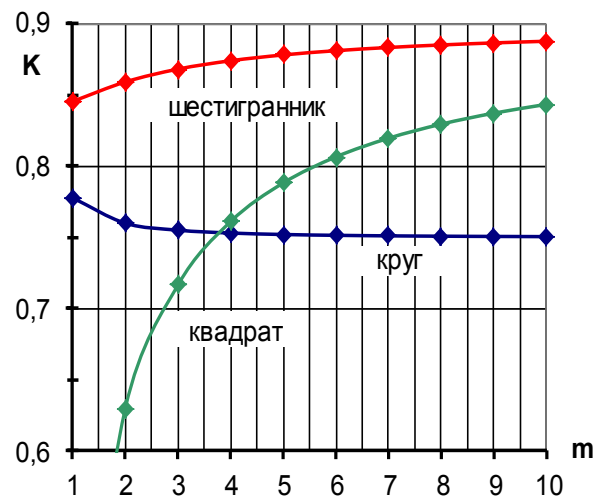


Рис. 2. Коэффициент заполнения

Таким образом, с целью рационального использования материала в многожильном металлическом кабеле целесообразно применять упорядоченную укладку проволок; и наиболее компактная паковка формируется с использованием шестигранной оболочки. На рис. 2. изображен график изменения коэффициента заполнения в зависимости от количества слоев проволоки для различных форм поперечного сечения оболочек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Реут О.П. Изостатическое обжатие контактных соединений (КС) сверхпроводящего кабеля магнитных систем термоядерного реактора ИТЭР / О.П. Реут, Л.С. Богинский, А.Ч. Якубовский, В.И. Ярмолинский // Материалы докладов международного симпозиума «Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка». — Минск: ИПМ, 2009. — Ч. 2. — С. 131–134.